

Строение снежной толщи на Кольском полуострове© 2021 г. Н.А. Казаков^{1*}, Е.Н. Казакова¹, А.В. Волков²¹Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия;²Управление главного инженера АО «Апатит», Кировск, Россия

*cdsmid@yandex.ru

The structure of the snow thickness on the Kola PeninsulaN.A. Kazakov^{1*}, E.N. Kazakova¹, A.V. Volkov²¹Special Research Bureau for Automation of Marine Researches FEBRAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia;²Division of avalanche safety JSC «Apatit», Kirovsk, Russia

*cdsmid@yandex.ru

Received November 27, 2020 / Revised March 6, 2021 / Accepted March 19, 2021

Keywords: *snowpack structure, snowpack texture, snowpack lithostratigraphic complex, Kola Peninsula.***Summary**

In 2016–2019, the structure of the snow thickness in the northern and central parts of the Kola Peninsula (from the Barents Sea to the Khibiny Mountains) was studied in tundra, forest-tundra, taiga, high-altitude Arctic and other landscapes during the periods of maximum recrystallization of the snow (February–April) and initial snow accumulation (October). 37 borings were made in the snow thicknesses. 399 snow layers of different ages and genesis were examined. In the total, 399 measurements of the density, porosity, structure of snow (size and shape of ice crystals) and texture (orientation of crystals and pores) of snow layers, 413 measurements of temperature at the contacts between snow layers, 46 measurements of the temporary resistance of the layer to rupture, 27 measurements of the time resistance to compression, 119 measurements of the resistance of the snow layer to horizontal sounding (with a cross-shaped tip that allows taking into account the anisotropy of the snow layer) were performed. The percentage of crystals of different classes of shapes in the layer was determined. It was found that the Kola Peninsula has a high rate of evolution of the snow thickness. Even in multi-snow winters (including the landscapes of high-altitude Arctic deserts in Khibiny and Monche-tundra) in March, up to 90% of the snow thickness is made up of snow layers with a columnar and fibrous texture, composed of ice crystals of semi-skeletal and skeletal classes of shapes with diameters of up to 4 mm. These patterns of the evolution are typical for the Arctic and Subarctic (confirmed by studies on the Yamal Peninsula, in the lower reaches of the Northern Dvina River and in Karelia). Values of the strength characteristics of the snow layer (time resistance to rupture, resistance to compression, and to horizontal sounding with regard for the anisotropy of the snow layer texture) are the lower, the higher the content of crystals in the layer of the highest stages of evolution (skeletal) and the more developed the texture of the layer. The lowest values of strength characteristics were observed in snow layers with a fibrous texture.

Citation: Kazakov N.A., Kazakova E.N., Volkov A.V. The structure of the snow thickness on the Kola Peninsula. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021. 61 (3): 404–419. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421030097.

Поступила 27 ноября 2020 г. / После доработки 6 марта 2021 г. / Принята к печати 19 марта 2021 г.

Ключевые слова: *структура снежной толщи, текстура снежного слоя, литолого-стратиграфический комплекс снежного покрова, Кольский полуостров.*

В 2016–2019 гг. исследовалась структура, текстура и физические свойства снежной толщи в северной и центральной частях Кольского полуострова в тундровых, лесотундровых, таёжных, высокогорных арктических и других ландшафтах в периоды начального снегонакопления (октябрь) и максимальной перекристаллизации снежной толщи (февраль–апрель). В 37 шурфах было исследовано 399 снежных слоёв разного возраста. Установлено, что к марту до 90% снежной толщи состоит из снежных слоёв со столбчатой и волокнистой текстурой, сложенных ледяными кристаллами полускелетного и скелетного классов диаметром до 4 мм.

Введение

Снежный покров на Кольском полуострове — постоянно действующий фактор, сильно влияющий на социальные и экономические процессы. Физические характеристики снежно-

го покрова, которые зависят от его стратификации, структуры и текстуры, определяют условия проходимости территории транспортными средствами в зимнее время, характеристики половодья и условия возникновения наиболее разрушительных лавин. Знания о строении снежной

толщи необходимы для решения целого ряда задач, в числе которых:

1) прогноз лавин — определение времени появления и мощности лавиноопасных снежных слоёв;

2) расчёт параметров половодья и его прогноз — скорость таяния сильно перекристаллизованной и сильно разрыхлённой снежной толщи гораздо выше, чем уплотнённой снежной толщи, что приводит к быстрому снеготаянию и стремительному подъёму уровня воды, вызывая высокий, но быстро проходящий паводок. Данный фактор не учитывается при прогнозе половодья, поэтому скорость подъёма уровня воды в половодье сильно занижается или завышается. Отметим, что для качественного прогноза половодья знание только водозапаса в снежном покрове недостаточно;

3) определение числа снегопадов и сумм твёрдых осадков за снегопад в тех районах, где нет метеорологических наблюдений, по числу снежных слоёв в снежной толще и их водному эквиваленту;

4) проходимость снежной целины транспортными средствами, которая зависит не только от толщины снежного покрова, но и от степени его перекристаллизации: при сильной перекристаллизации снежной толщи даже лёгкие снегоходы проваливаются в снег и теряют возможность передвигаться. Однако структура, текстура и стратификация снежной толщи на Кольском п-ове практически не исследовалась (за исключением Хибин), здесь никогда не создавались и карты строения снежной толщи.

Постановка задачи исследований

На Кольском п-ове стратиграфические наблюдения в снежной толще проводили с середины 1930-х годов в Хибинах Цехом противолавинной защиты ПО «Апатит» (Отдел лавинной безопасности АО «Апатит») [1] и географическим факультетом МГУ имени М.В. Ломоносова [2, 3]. Однако исследование строения снежной толщи на остальной части полуострова до 2016 г. не вели. Отсутствие данных о стратификации, структуре и текстуре снежного покрова не позволяет представить строение снежной толщи, оценить значения её физических харак-

теристик в разные периоды зимнего сезона и построить карты снежного покрова на Кольском п-ове. Задачи настоящего исследования включают в себя: 1) получение данных о строении снежной толщи (структуры, текстуры, стратификации) в центральной части Кольского п-ова; 2) выяснение зависимости строения снежной толщи от типа ландшафта, а также зависимости прочностных характеристик снежной толщи от её структуры и текстуры; 3) изучение данных о скорости перекристаллизации снежной толщи.

При ограниченном объёме полевых наблюдений строение снежной толщи на неизученной или слабоизученной территории можно определить на основе представлений об эволюции снежного покрова [4–6] и литолого-стратиграфических комплексах снежной толщи [6, 7]. Исследования [6–10] показали, что в зимние сезоны снежная толща в однотипных ландшафтах (даже расположенных в разных регионах) со схожими гидрометеорологическими условиями имеет сходное строение. Это показывает, что процессы, формирующие снежную толщу, определяются характеристиками вмещающего ландшафта. В результате появляется возможность систематизировать типы строения снежной толщи так же, как систематизированы комплексы горных пород: по идентичности гидрометеорологических, геофизических и других условий их седиментации и диагенеза, а не по географическому положению объекта.

Снежную толщу можно описать как осадочную мономинеральную горную породу [3, 6, 11–13] (пакет снежных слоёв разного возраста с разными физическими характеристиками), в которой лёд — основной порообразующий минерал. Отметим, что понятие «снег — мономинеральная горная порода» было предложено Г.Д. Рихтером [11]. Такой подход к описанию снежной толщи позволяет использовать для её исследования методы, разработанные в геологии для описания и классификации горных пород [14].

Снежный слой, сформировавшийся во время снегопада и эволюционирующий в *однотипных* ландшафтах при сходных геофизических и метеорологических условиях, правомерно описывать как *фацию*, а генетическую совокупность снежных слоёв (снежную толщу) в *однотипном* ландшафте — как геологическую *формацию*. Тогда снежная толща, залегающая в однотипных

ландшафтах, проходящая седиментацию и диагенез (син- и эпигенез) в сходных гидрометеорологических и геофизических условиях, может быть описана как *литолого-стратиграфический комплекс (ЛСК)* [6, 7]. Воздействие на снежную толщу гидрометеорологических и геофизических факторов, близких по своим параметрам, приводит к формированию в однотипных ландшафтах в однотипные зимы спектров стратиграфических колонок с близкими структурой, текстурой, стратификацией (число и толщина снежных слоёв) и физическими характеристиками.

Учение об эволюции снежного покрова [4, 5] позволяет построить прогноз изменения структуры и текстуры снежной толщи в процессе её эволюции. В нашем представлении, эволюция снежного покрова — детерминированный процесс, вызывающий образование, накопление и метаморфизм снежной толщи в результате совокупного воздействия гидрометеорологических и геофизических факторов [6, 7]. На разных этапах эволюции формируется снежная толща с определённой структурой, текстурой и стратификацией, которые определяют физические (в том числе прочностные) характеристики снежного покрова. Литолого-стратиграфический комплекс снежного покрова эволюционирует в конкретном ландшафте под воздействием всей совокупности протекающих в нём физических, геологических и географических процессов.

В *однотипных* ландшафтах [15], расположенных в разных регионах, формируются близкие по своим параметрам ЛСК. В *неоднотипных* ландшафтах литолого-стратиграфический комплекс даже в однотипные зимы имеет разную стратификацию, структуру и текстуру снежной толщи. Эволюция ЛСК детерминирована: структурно-текстурные и физические характеристики снежной толщи задаются гидрометеорологическими и геофизическими условиями вмещающего ландшафта и могут быть рассчитаны. Тогда, зная строение снежной толщи на изученной территории, для однотипных ландшафтов можно: а) определить её строение на неизученных территориях; б) количественно описать её строение в любой период зимнего сезона на любой территории для разных типов зим. Эти представления позволяют на основе данных полевых исследований снежной толщи в шурфах, расположенных в определённых ландшафтах,

построить карту строения снежной толщи (ЛСК снежного покрова) для однотипных ландшафтов по всей территории исследований.

Основные управляющие параметры в физической системе «снежная толща» — структура (форма и размер ледяных кристаллов) и текстура (взаимное расположение кристаллов в снежном слое и ориентация пор и дендритов ледяных кристаллов внутри снежного слоя, отражающая анизотропию снежного слоя, обусловленную ориентацией пор и дендритов ледяных кристаллов). При эпигенезе снежной толщи их ориентация из хаотической (монокристаллическая текстура — изотропный слой) становится вертикальной (столбчатая и волокнистая текстуры — анизотропные слои), в результате чего прочностные характеристики снежного слоя (твёрдость, сопротивление сжатию и др.) становятся зависимы от направления приложения воздействия: параллельно простиранию слоя или вертикально. По этой причине структура и текстура снежной толщи выбраны в качестве параметров для количественного описания строения снежной толщи.

Методика исследований

Исследования проводили в северной и центральной частях Кольского п-ова: от побережья Баренцева моря до Хибин в период максимальной перекристаллизации снежной толщи (март) (рис. 1). В шурфах в снежной толще послойно определяли плотность и пористость снега (рассчитывалась через его плотность), структуру снега, текстуру снежных слоёв; измеряли температуру в снежной толще на контактах между снежными слоями, а также временное сопротивление снежного слоя разрыву и сжатию при вертикальном приложении нагрузки и сопротивление снежного слоя зондированию с учётом анизотропии его текстуры. В последнем случае использовали зонд с наконечником крестообразной формы [16], позволяющим учитывать анизотропию текстуры снежного слоя.

Стратиграфическую колонку описывали по классификации отложенного снега [6, 9]. Классы форм ледяных кристаллов вторично-идiomорфного снега определяли в соответствии с данными работ [3, 17, 18]. Одновременно выполняли площадную снегосъёмку на снегомерных

площадках в разных ландшафтах, по результатам которой определяли среднюю и максимальную толщину снежного покрова и его водный эквивалент (водозапас). Во время стратиграфических исследований снежной толщи при помощи полевой метеорологической станции вели метеорологические наблюдения, в процессе которых измеряли температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление, облачность, фиксировали метеорологические явления. При исследовании снежной толщи в шурфах выполняли макрофотосъёмку ледяных кристаллов из каждого снежного слоя. Затем при камеральной обработке фотографий выделяли классы форм ледяных кристаллов (для первично-идиоморфного снега – по [17], для вторично-идиоморфного снега – по морфогенетической классификации Э.Г. Коломыца [5, 18, 19]), определяли их средний и максимальный размеры и рассчитывали процентное содержание в снежном слое кристаллов разных классов форм. Эти параметры устанавливали по статистической выборке из 20–100 кристаллов каждого снежного слоя с использованием программного комплекса для автоматизации стратиграфических исследований снежной толщи в снежных шурфах [20]. Процентное содержание в снежном слое кристаллов разных классов форм и возраст снежного слоя (табл. 1) необходимо диагностировать для установления стадии эволюции снежной толщи и прогноза её преобразования.

Текстуру снежного слоя исследовали визуально. Для оценки степени упорядоченности ориентации дендритов ледяных кристаллов и пор в снежном слое выделяют три типа текстуры: монолитную, столбчатую и волокнистую [6, 9, 18]. В ходе эволюции снежной толщи текстура изменяется от монолитной до волокнистой.

Определяли число снежных слоёв, их толщину, плотность, твёрдость и их возраст (от момента формирования слоя во время снегопада и т.п.) – важнейший параметр, позволяющий рассчитывать скорость эволюции структуры снежного слоя. В качестве количественных критериев, характеризующих строение снежной толщи на разных стадиях её эволюции и служащих основанием для выделения однотипных литолого-стратиграфических комплексов снежного покрова, выбраны коэффициенты перекристаллизации K_{Π} [5, 19], вторичного рас-

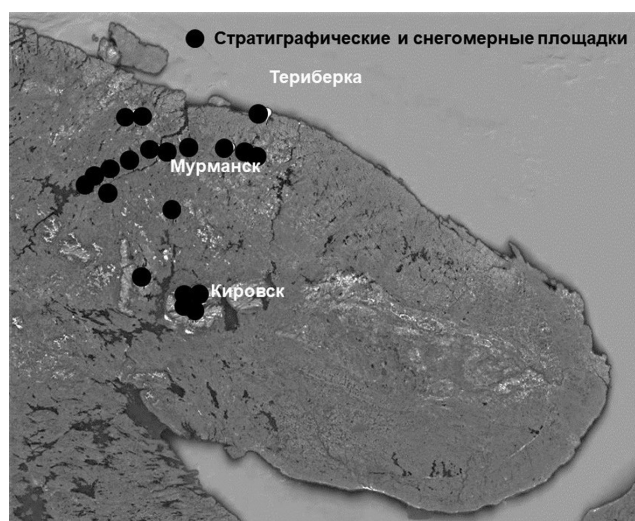


Рис. 1. Районы исследования снежной толщи в 2016–2019 гг.

Fig. 1. Areas of study of snowpack in 2016–2019.

слоения снежной толщи $K_{ВР}$ и текстуры снежного слоя K_T [6, 9]:

$$K_{\Pi} = H_1/H; \quad (1),$$

$$K_{ВР} = \Sigma N_2/\Sigma H_1; \quad (2),$$

$$K_T = H_B/H, \quad (3),$$

где H – толщина снежного покрова; H_1 – суммарная толщина снежных слоёв вторично-идиоморфного снега; H_B – суммарная толщина снежных слоёв с волокнистой текстурой; ΣN_2 – суммарное содержание в снежной толще кристаллов скелетного, секториального и пластинчатого классов форм, %; ΣN_1 – суммарное содержание в снежной толще кристаллов вторично-идиоморфного снега, %.

Сочетание этих коэффициентов позволяет количественно описать строение и степень преобразования снежной толщи (табл. 2) в любой период зимнего сезона на любой территории для четырёх типов зим: мало-, средне-, многоснежных и зимы с частыми оттепелями (в такие зимы в снежной толще формируются многочисленные режеляционные и ледяные корки). От типа зимы зависят условия седиментации и диагенеза снежной толщи и её стратификация, т.е. характер и скорость её эволюции.

Тип зимы устанавливался на основе средне-многолетних данных наблюдений за осадками и снежным покровом на расположенных в районе исследований гидрометеорологических стан-

Таблица 1. Оформление результатов стратиграфических наблюдений в снежной толще

[illegible]

Таблица 2. Степень преобразования структуры и текстуры снежной толщи

Коэффициент вторичного расслоения снежной толщи	Степень преобразования структуры снежной толщи	Коэффициент текстуры снежной толщи	Степень преобразования текстуры снежной толщи
$> 0,5$	Сильно перекристаллизованная	$> 0,3$	Сильно разрыхлённая
$> 0,3 - \leq 0,5$	Средне перекристаллизованная	$> 0,2 - \leq 0,3$	Средне разрыхлённая
$> 0,1 - \leq 0,3$	Умеренно перекристаллизованная	$> 0,1 - \leq 0,2$	Умеренно разрыхлённая
$\leq 0,1$	Слабо перекристаллизованная	$\leq 0,1$	Слабо разрыхлённая

Таблица 3. Зависимость прочностных характеристик снежного слоя от содержания ледяных кристаллов разных классов форм (Кольский п-ов, 2016–2019 гг.)

Класс формы кристалла	Содержание в слое ледяных кристаллов разных классов форм, %	Временное сопротивление снежного слоя, кг/м ²		Сопротивление горизонтальному зондированию, кгс
		разрыву	сжатию	
Гранный	30–80	200–320	60–100	0,50–0,65
Полускелетный	15–63	120–180	40–70	0,35–0,55
Скелетный	6–18	43–120	18–25	0,30–0,45
	40–70	33–35	16–18	0,22–0,25

циях Мурманского УГМС [21, 22] – Ура-Губа, Териберка, Мурманск, Кола, Мурмаши, Падун (Верхнетуломский), Ниванкюль, Пулозеро, Мончегорск, Апатиты, а также на горно-лавинных участках ПО «Апатит» (ОАО «Апатит») [1] – Кировск, Центральная, Юкспор, УДО-1. В период наших исследований тип зимы определяли по толщине снежного покрова и сумме твёрдых осадков по сравнению со среднесезонными их значениями в районе расположения шурфа.

Для решения поставленной задачи, однако, правильнее ориентироваться именно на толщину снежного покрова, поскольку скорость его перекристаллизации (т.е. скорость изменения структуры и текстуры снежных слоёв) в первую очередь зависит от толщины снежного покрова, а не от суммы твёрдых осадков. В ландшафтах тундры, лесотундры, горных тундр и Арктической пустыни сильный метелевый перенос снега вызывает уменьшение толщины снега на наветренных склонах, равнинах и водоразделах, что в свою очередь определяет высокую скорость перекристаллизации снежной толщи и формирование сильно разрыхлённой толщи с низкими значениями прочностных характеристик. Вместе с тем в понижениях рельефа и на подветренных склонах образуется снежная толща значительной глубины и высокой плотности, в которой сильно замедляются процессы перекристаллизации снега, что приводит к формированию слабо разрыхлённой снежной толщи с высокими значениями прочностных характеристик.

Таксономическая шкала литолого-стратиграфических комплексов снежного покрова [6, 7], базирующаяся на принципах построения ландшафтных классификаций, и количественная оценка степени преобразования снежной толщи (табл. 3) позволяют определять строение снежной толщи для зим разных типов на основании ряда методологических принципов. Рассмотрим их.

Ландшафтно-индикационные свойства снежного покрова дают возможность восстанавливать картину его эволюции в неизученных районах на основе ландшафтного и климатического описания. Спектр типов стратиграфических колонок снежного покрова обусловлен полиморфной структурой ландшафта [5, 8, 9], степенью его гидроморфности [6, 10] и спектром гидрометеорологических условий зимы в исследуемом районе, что позволяет рассчитать характеристики снежной толщи при недостатке полевых данных. *Представление об эволюции снежного покрова* как о детерминированном процессе позволяет в малоизученных районах выделить типы литолого-стратиграфических комплексов снежного покрова и таксоны, сходные по ландшафтным условиям седиментации и диагенеза снежной толщи с такими же таксонами в изученных районах, и на основе характеристик снежного покрова в изученных районах рассчитать значения её характеристик в неизученных районах.

С помощью разработанной методологии на основе теории эволюции снежной толщи можно

В ходе стратиграфических исследований снежной толщи было описано 37 шурфов в северной и центральной частях Кольского п-ова (от берега Баренцева моря до Хибин) в ландшафтах 12 типов, исследовано 399 снежных слоёв разного возраста и генезиса, выполнено 399 измерений плотности, пористости снега, структуры снега, определений текстуры снежных слоёв, 413 измерений температуры в снежной толще,

46 измерений временного сопротивления снежного слоя разрыву, 27 измерений временного сопротивления снежного слоя сжатию и 119 измерений сопротивления зондированию (твёрдость) с учётом анизотропии текстуры снежного слоя. Исследования вели в периоды наибольшей перекристаллизации снежной толщи (февраль—март). Кроме того, в ландшафтах высокогорной Арктической пустыни (Хибины, высота 1075 м) исследования проводили в период начального снегонакопления и начальных стадий эволюции снежной толщи (октябрь).

При исследовании строения снежной толщи использованы материалы наблюдений в 92 шурфах в Хибинах в высотной зоне 370–1075 м (в том числе: 35 — в зонах зарождения лавин на восточных склонах хр. Поачвумчорр и на западном склоне хр. Кукисвумчорр; 6 — на линиях отрыва сошедших лавин), выполненных Н.А. Казаковым в 1985–1988 гг. [26] и А.В. Волковым в 2016–2018 гг. Среднюю и максимальную толщину снежного покрова и его водный эквивалент (водозапас) в разных ландшафтных зонах измеряли на 37 снегомерных площадках. На 37 метеорологических пунктах были измерены температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление, облачность, зафиксированы метеорологические явления, что позволило связать текущие значения характеристик снежной толщи с метеорологическими условиями.

Результаты

В феврале—марте 2016 г., в марте и октябре 2017 г. и в марте—апреле 2019 г. нами были выполнены полевые исследования структуры, текстуры, стратификации и физико-механических характеристик снежного покрова в разных ландшафтах Кольского п-ова: кустарничковая тундра; лишайниково-ерниковая и ерничково-лишайниковая тундры; травянистые, травяно-моховые и кочковато-мочажинные болота; лесотундровые берёзовые редколесья и криволесья; северотаёжные сосново-берёзовые леса; северотаёжные елово-берёзовые леса; северотаёжные елово-берёзовые леса внутригорных котловин; горные лесотундровые берёзовые редколесья и криволесья; лишайниково-кустарничковые и кустарничково-

лишайниковые горные тундры; горные тундры в урочищах горных склонов; высокогорные Арктические пустыни (см. рис. 1 и табл. 5). В результате полевых исследований 2019 г. и анализа данных полевых исследований 2016–2017 гг. были уточнены и дополнены данные о строении снежной толщи и исследован характер её эволюции в многоснежные зимы и зимы с оттепелями. По результатам исследований построены стратиграфические колонки снежной толщи в ландшафтах разных типов (рис. 2, 3).

Массовые измерения прочностных характеристик снежного слоя (временное сопротивление разрыву и сжатию; сопротивление зондированию параллельно простиранию снежного слоя с учётом анизотропии текстуры снежного слоя — дополнительный параметр для определения несущей прочности снежной толщи) показали зависимость прочностных характеристик снежного слоя (определяющих прочность снежного слоя при внешнем воздействии) от его структуры (содержания в слое кристаллов разных классов форм) и текстуры (см. табл. 3).

На основе анализа результатов полевых исследований снежной толщи на Кольском п-ове установлено, что содержание ледяных кристаллов гранного класса форм в снежном слое возрастом 7–12 сут. может составлять 100%, а в слое возрастом 20–50 сут. — 30–40%. В слое возрастом 15–30 сут. содержание кристаллов скелетного класса форм — 6–18%, в слое возрастом 20–50 сут. — 30–40%, в слое возрастом 55–65 сут. — 50–60%. В слое возрастом 50–60 сут. содержание ледяных кристаллов гранного класса форм — 10–20%, полускелетного класса форм — 20–50%, скелетного класса форм — 40–70%, секториального класса форм — 2–40%. Выявлена высокая скорость эволюции снежной толщи. Даже в многоснежные зимы в первой половине марта 60–100% снежной толщи представлено снежными слоями со столбчатой и волонистой текстурой, сложенными кристаллами полускелетного и скелетного классов форм размером 2,0–5,0 мм.

В снежном покрове в ландшафтах высокогорных Арктических пустынь в Хибинах (высота более 1000 м) формируются ослабленные снежные слои из зернистой изморози, погребённой в снежной толще под слоем свежеснежного и метелевого снега (см. табл. 1 и рис. 2, 3). Её пе-

Таблица 5. Строение снежной толщи на Кольском полуострове в период максимальной перекристаллизации снежной толщи (первая декада марта)

Литолого-стратиграфический комплекс снежного покрова	Высота, м	Толщина снежного покрова, см		Степень перекристаллизации и разрыхления снежной толщи*					Проходимость снежной целины транспортными средствами**
		средне- летняя	в шурфе	К _П	К _{ВР}	К _Г	Тип зимы	Тип снежной толщи	
I. Травянистых комплексов морских побережий	20	30	24	0,74	0,07	0,00	2, 4	Слабо перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
II. Кустарничково-лишайниковых и лишайничково-кустарничковых тундр	200–300	45	46	0,93	0,14	0,13	2, 4	Умеренно перекристаллизованная, умеренно разрыхлённая	Х
			27	0,82	0,11	0,26	3	Умеренно перекристаллизованная, средне разрыхлённая	У
III. Травянистых, травяно-моховых и кочковато-мочажинных болот с редкой сосной и берёзой	100–250	50	90	0,88	0,01	0,03	1, 4	Слабо перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
			64	0,74	0,14	0,30	1	Умеренно перекристаллизованная, умеренно разрыхлённая	У
			43	1,00	0,29	0,40	3	Умеренно перекристаллизованная, сильно разрыхлённая	П
IV. Лесотундровых берёзовых редколесий и криволесий лишайниковых и лишайничково-зеленомошных	200–250	63	104	0,85	0,08	0,00	1, 4	Слабо перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
			86	1,00	0,19	0,00	1	Умеренно перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
V. Лесотундровых берёзовых криволесий кустарничково-зеленомошных	200–250	63	123	0,93	0,07	0,00	1, 4	Слабо перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
			75	0,99	0,14	0,25	1	Умеренно перекристаллизованная, средне разрыхлённая	У
VI. Лесотундровых берёзовых криволесий лишайничково-зеленомошных	150–250	75	116	0,97	0,02	0,00	1	Слабо перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
			85	0,90	0,01	0,11	1, 4	Слабо перекристаллизованная, умеренно разрыхлённая	Х
VII. Северотаёжных елово-сосновых лесов зеленомошных	100–150	54	55	0,96	0,12	0,36		Умеренно перекристаллизованная, сильно разрыхлённая	П
			73	0,93	0,03	0,25	1, 4	Слабо перекристаллизованная, средне разрыхлённая	У
VIII. Северотаёжных сосновых лесов кустарничково-зеленомошных	100–150	54	50	0,92	0,16	0,48	2	Умеренно перекристаллизованная, сильно разрыхлённая	П
			78	0,86	0,02	0,00	1, 4	Слабо перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
IX. Северотаёжных елово-берёзовых лесов кустарничково-зеленомошных	20–80	63	67	0,90	0,51	0,18	2, 4	Сильно перекристаллизованная, умеренно разрыхлённая	У
			53	0,96	0,27	0,57	3	Умеренно перекристаллизованная, сильно разрыхлённая	П

X. Северотаёжных елово-берёзовых лесов лишайниково-зеленомошных	50–150	54	77	0,90	0,03	0,13	1, 4	Слабо перекристаллизованная, умеренно разрыхлённая	У
			56	0,96	0,18	0,46	2	Умеренно перекристаллизованная, сильно разрыхлённая	П
XI. Северотаёжных берёзовых лесов кустарничково-зеленомошных	50–150	54	58	0,91	0,11	0,43	2	Умеренно перекристаллизованная, сильно разрыхлённая	П
XII. Северотаёжных берёзово-елово-сосновых лесов лишайниково-зеленомошных и лишайниковых	100–150	62	71	0,94	0,15	0,23	1	Средне перекристаллизованная, средние разрыхлённая	У
XIII. Северотаёжных сосновых лесов кустарничково-зеленомошных	100–200	54	69	0,87	0,00	0,00	1	Слабо перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
XIV. Северотаёжных берёзовых лесов внутригорных котловин	300–400	119	122	0,88	0,08	0,20	1	Слабо перекристаллизованная, средние разрыхлённая	У
			113	0,89	0,26	0,31	2	Средне перекристаллизованная, сильно разрыхлённая	П
XV. Северотаёжных елово-берёзовых зеленомошных лесов внутригорных котловин	300–400	119	152	0,81	0,01	0,00	1, 4	Слабо перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
			151	0,89	0,06	0,13	1	Средне перекристаллизованная, средние разрыхлённая	У
XVI. Горных лесотундровых берёзовых редколесий и криволесий	300–400	129	105	0,95	0,21	0,26	3	Средне перекристаллизованная, среднеразрыхлённая	У
			92	0,99	0,26	0,32	3	Средне перекристаллизованная, сильно разрыхлённая	П
XVII. Лишайниково-кустарничковых и кустарничково-лишайниковых горных тундр	200–300	57	34	1,00	0,23	0,21	3, 4	Средне перекристаллизованная, средние разрыхлённая	П
			48	0,75	0,24	0,73	3	Средне перекристаллизованная, сильно разрыхлённая	П
XVIII. Горных тундр	400–700	130	111	0,81	0,08	0,02	3	Слабо перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
			66	1,00	0,37	0,15	3	Средне перекристаллизованная, умеренно разрыхлённая	У
			56	1,00	0,20	0,16	3	Умеренно перекристаллизованная, умеренно разрыхлённая	У
XIX. Высокогорных Арктических пустынь	Более 700	115	69	0,97	0,14	0,00	3, 4	Умеренно перекристаллизованная, слабо разрыхлённая	Х
			57	1,00	0,07	0,23	3	Слабо перекристаллизованная, средние разрыхлённая	У

*Коэффициенты строения снежной толщи: К_п – перекристаллизации, К_{вр} – вторичного расслоения, К_т – текстуры.

Тип зимы: 1 – многоснежная, 2 – среднеснежная, 3 – малоснежная, 4 – с оттепелями.

**Проницаемость снежной целины транспортными средствами: Х – хорошая, У – удовлетворительная, П – плохая.

02.03.2017 Многолетняя зима												
Номер слоя	Высота контакта, см	Тип снега и класс формы кристалла (по Э.Г. Коломыву);	Плотность, г/см³	Водность, мм	Сред.	Макс.	Содержание классов форм кристаллов, %			Температура, °C	Возраст слоя, сутки	Пористость, %
							Дiameter кристалла, мм	Сред.	Макс.			
12 78	7	///	0,1	8								89
11 70	11	///	0,2	14	0,62	1	70	30				78
10 63	10	////	0,28	8,4								69
9 60	9	///	0,28	5,6	0,84	1,3	70	30				69
8 58	8	///	0,28	8,4	0,63	1,1	69	31				69
7 55	7	///	0,27	13,5			64	35				71
6 50	6	///	0,28	36,4	0,78	1,1	73	27				69
5 37	5	///	0,35	10,5	0,94	1,4	59	41				62
4 34	4	////	0,41	36,9	0,93	1,9						55
3 25	3	///	0,35	17,5	1,32	5	56	44				62
2 20	2	///	0,4	32	1,16	1,8	40	60				56
1 12	1	///	0,35	43,2	1,71	2,6	45	39	16			61
0	0	Водозапас, мм	234,4									-2
Коэффициенты: перекристаллизации - 0,90; вторичного распыления - 0,02; текстуры - 0,00												

09.04.2019 Среднеснежная зима												
Номер слоя	Высота контакта, см	Тип снега и класс формы кристалла (по Э.Г. Коломыву);	Плотность, г/см³	Водность, мм	Сред.	Макс.	Содержание классов форм кристаллов, %			Температура, °C	Возраст слоя, сутки	Пористость, %
							Дiameter кристалла, мм	Сред.	Макс.			
12 67	12	///	0,5	5								45
11 66	11	///	0,26	13	0,50	8	100					72
9 61	9	///	0,27	18,9	0,60	9	73	27				71
8 54	8	///	0,8	8			67	33				13
7 53	7	///	0,31	9,3	0,21	2						66
6 50	6	///	0,36	18	1,52	4	20	80				61
5 45	5	///	0,28	11,2	1,52	3	62	38				69
4 41	4	///	0,31	43,4	3	6,5	8	88	4			66
3 27	3	///	0,25	37,5	2,8	6,1	20	80				73
2 12	2	///	0,26	13	3,96	2	7	90	3			72
1 7	1	///	0,23	16,1	3,55	4						75
0	0	Водозапас, мм	193,4									-0,3
Коэффициенты: перекристаллизации - 0,90; вторичного распыления - 0,50; текстуры - 0,38												

05.03.2016 Малоснежная зима												
Номер слоя	Высота контакта, см	Тип снега и класс формы кристалла (по Э.Г. Коломыву);	Плотность, г/см³	Водность, мм	Сред.	Макс.	Содержание классов форм кристаллов, %			Температура, °C	Возраст слоя, сутки	Пористость, %
							Дiameter кристалла, мм	Сред.	Макс.			
6 53	6	///	0,21	18,9	0,91	8	52	43	5			77
5 44	5	///	0,33	37,95	1	1,7	33	44	23			64
4 32	4	///	0,28	7			0	0	0			69
3 30	3	///	0,26	15,6	1,12	6	39	38	23			72
2 24	2	///	0,22	17,6	1,32	8	40	36	2			76
1 16	1	///	0,26	41,6	2	3,9	5	37	58			72
0	0	Водозапас, мм	138,7									-0,57
Коэффициенты: перекристаллизации - 0,96; вторичного распыления - 0,41; текстуры - 0,57												

Рис. 2. Стратиграфические колонки снежной толщи в много-, средне- и малоснежную зиму. Северная тайга, берёзово-еловый лес. Левый берег р. Тулома.

a – малоснежная зима (2016 г.); *б* – среднеснежная зима (2019 г.); *в* – многоснежная зима (2017 г.)

Fig. 2. Pitsofthesnowpacksnow-heavy, medium-snowandlow-snow winter. Northern taiga. Birch and spruce forest. Left Bank of the Tuloma River.

a – low-snow winter (2016); *б* – medium-snow winter (2019); *в* – snow-heavy winter (2017)

рекристаллизация приводит к возникновению в снежной толще снежных слоёв с низкими значениями прочностных характеристик (временное сопротивление разрыву и сжатию) — лавиноопасных слоёв. На основе данных полевых исследований определены количественные характеристики строения снежной толщи (степень преобразования её структуры и текстуры) и её тип (см. табл. 5) и выполнена оценка проходимости снежной целины транспортными средствами в много- и среднеснежную зимы (см. табл. 5) в марте — период наибольшей перекристаллизации снежной толщи и её наименьшей несущей прочности.

Обсуждение результатов

Анализ результатов стратиграфических наблюдений в снежной толще показал, что в центральной части Кольского п-ова через 12–20 сут. после формирования снежного слоя в нём появляются ледяные кристаллы скелетного класса форм размером 1,3–2,2 мм. Через 50–80 сут. (в зависимости от метеорологических условий предзимья и начального периода снегонакопления) возникают ослабленные снежные слои с волокнистой текстурой, выполненные ледяными кристаллами полускелетного и скелетного классов форм диаметром 2,0–5,0 мм. Даже в многоснежные зимы в первой половине марта 60–80% снежной толщи выполнено ледяными кристаллами полускелетного и скелетного классов форм размером 2,0–5,0 мм со (см. табл. 1 и рис. 2, 3). Ледяные кристаллы секториального и пластинчатого классов форм появляются в снежной толще через 85–100 сут. после формирования снежного слоя. Уже в январе в подошве снежной толщи возникают слои кристаллов скелетного класса форм с волокнистой текстурой плотностью 0,22–0,30 г/см³. В апреле снежная толща вступает в период регрессивного метаморфизма и её строение упрощается, а сама толща становится прочнее.

В многоснежные зимы в марте до 100% снежной толщи может быть выполнено также снежными слоями со столбчатой и волокнистой текстурой, сложенными ледяными кристаллами полускелетного и скелетного классов форм, а в ландшафтах высокогорных Арктических пустынь

в Хибинах и Монче-тундрах (в которых формируется толща метелевого снега плотностью до 0,55 г/см³) к началу марта до 90–100% снежной толщи может быть сложено перекристаллизованными ледяными кристаллами полускелетного и скелетного классов форм размером до 3,95 мм. В многоснежные зимы с оттепелями в снежном покрове формируются многочисленные ледяные и режеляционные корки (см. рис. 2, б, в; рис. 3, Б–Г), сильно замедляющие скорость перекристаллизации и разрыхления снежной толщи (см. табл. 5). Скелетные кристаллы появляются в этой зоне очень рано: уже в последней декаде октября на плато Айкуайвенчорр мы отмечали кристаллы скелетного класса форм размером до 2,5 мм. Содержание таких кристаллов в приземном слое (при толщине снежного покрова 36 см) достигало 20%. Это подтверждается и результатами наблюдений других исследователей [1].

Высокая скорость эволюции снежной толщи характерна для многих районов Арктики и Субарктики, что подтверждается результатами наших полевых исследований на п-ове Ямал, в низовьях р. Северная Двина [6, 7] и в Карелии. В этих районах в середине зимы в подошве снежной толщи формируются слои кристаллов скелетного класса форм с волокнистой текстурой плотностью 0,22–0,30 г/см³. Слои погребённой зернистой изморози — характерная особенность строения снежной толщи в Хибинах (и, вероятно, в ландшафтах высокогорных Арктических пустынь во всех горных массивах Кольского п-ова (рис. 4). Зернистая изморозь образуется в высотной зоне 500–1100 м на поверхности снежного покрова (см. рис. 4, а) в туманную и ветреную погоду при температуре воздуха –2 °С и ниже. На плато Ловчорр (высота 1101 м над ур. моря) за зиму в виде зернистой изморози выпадает до 56 мм осадков (до 6% всех осадков, выпадающих за зимний период) [1, 27]. Эти слои существенно уменьшают несущую прочность снежной толщи и, естественно, проходимость транспортными средствами снежной целины с высокой (в целом) несущей прочностью в ландшафтах высокогорных Арктических пустынь. Кроме того, лавиноопасные слои, формирующиеся из погребённой зернистой изморози, играют важную роль в образовании эпи- и полигенетических лавин.

Как показал анализ полевых измерений прочностных характеристик снежного слоя (временное

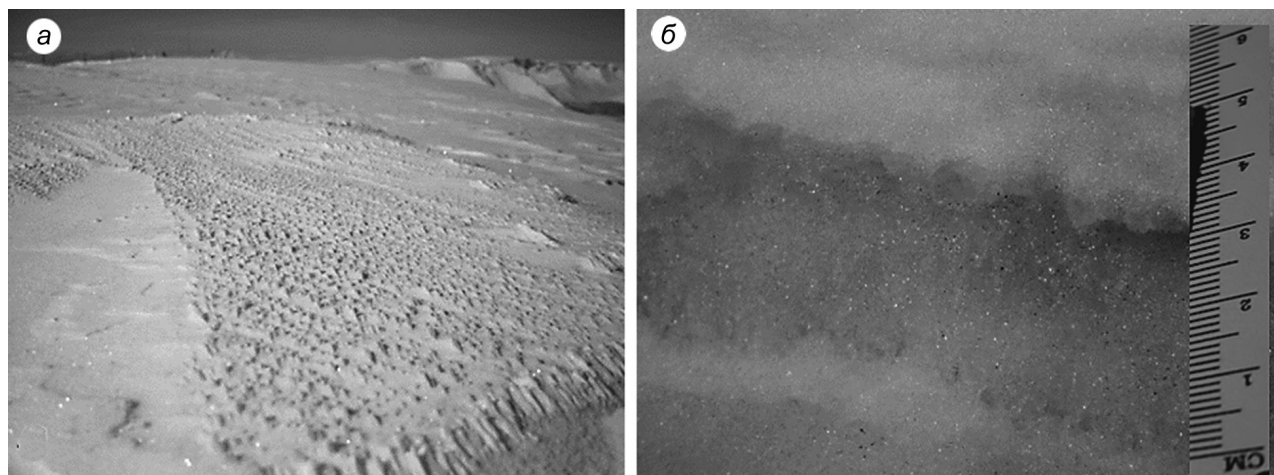


Рис. 4. Зернистая изморозь (Хибины, плато Расвумчорр):

a — отложенная на поверхности снежного покрова; *б* — погребённая в снежной толще

Fig. 4. Hard rime (The Khibiny mountain, the Rasvumchorr plateau):

a — deposited on the surface of the snow cover; *b* — buried in the snow pack

сопротивление разрыву и сжатию, сопротивление горизонтальному зондированию с учётом анизотропии текстуры снежного слоя), их значения тем ниже, чем выше содержание в слое кристаллов высших стадий эволюции (скелетных) и чем более развита текстура слоя: наименьшие значения прочностных характеристик отмечены в снежных слоях с волокнистой текстурой, сложенных ледяными кристаллами скелетного класса форм (см. табл. 3, 4). Отметим, что прямой зависимости временного сопротивления сжатию и разрыву и сопротивления горизонтальному зондированию от температуры и плотности снежного слоя не наблюдается. Высокая скорость эволюции снежной толщи на Кольском полуострове и высокая степень её перекристаллизации и разрыхления (в результате чего даже в ландшафтах высокогорных Арктических пустынь формируется снежная толща с низкими значениями прочностных характеристик) играет важную роль в формировании в снежной толще лавиноопасных слоёв.

Заключение

1. В ходе эволюции снежной толщи в центральной части Кольского п-ова через 12–20 сут. после формирования снежного слоя появляются ледяные кристаллы скелетного класса форм; через 85–100 сут. — кристаллы секториального и пластинчатого классов форм. За 70–80 сут. даже

в толще плотного метелевого снега формируются ослабленные снежные слои с волокнистой текстурой, сложенные кристаллами полускелетного и скелетного классов форм (лавиноопасные слои). В многоснежные зимы в марте до 100% снежной толщи может состоять из слоёв со столбчатой и волокнистой текстурой, сложенных кристаллами полускелетного и скелетного классов форм размером 2,0–5,0 мм.

2. Значения прочностных характеристик снежного слоя (временное сопротивление разрыву и сжатию, сопротивление горизонтальному зондированию с учётом анизотропии текстуры снежного слоя) тем ниже, чем выше содержание в слое кристаллов высших стадий эволюции (скелетных) и чем более развита текстура слоя; наименьшие значения прочностных характеристик отмечены в снежных слоях с волокнистой текстурой.

3. Определены количественные характеристики строения снежной толщи в разных литолого-стратиграфических комплексах снежного покрова центральной части Кольского п-ова и выполнена оценка проходимости снежной целины транспортными средствами в много- и среднеснежную зиму в феврале–марте (в период наибольшей перекристаллизации снежной толщи).

4. На Кольском п-ове высокая скорость эволюции снежной толщи и высокая степень её перекристаллизации и разрыхления повсеместно создают условия для образования эпи- и полигенетических лавин.

Литература

References

1. Зюзин Ю.Л. Суровый лик Хибин. Мурманск: Реклам. полиграфия, 2006. 236 с.
2. Савельев Б.А., Лаптев М.Н., Лаптева Н.И. Строе-ние, состав, физико-механические свойства снега в Хибинах и их изменения в процессе метамор-физма // Снег и лавины Хибин. М.: изд. МГУ, 1967. С. 201–239.
3. Тушинский Г.К. Лавины. Возникновение и защита от них. М.: Географгиз, 1949. 214 с.
4. Тушинский Г.К. Эволюция снежной толщи // Во-просы географии. 1950. № 27. С. 350–355.
5. Коломыц Э.Г. Теория эволюции в структурном сне-говедении. М.: «ГЕОС», 2013. 435 с.
6. Казаков Н.А. Литолого-стратиграфические ком-плексы снежного покрова: эволюция снежного покрова в Арктике и прогноз изменения физико-механических характеристик снежной толщи // Комплексные научные исследования и сотру-дничество в Арктике: взаимодействие вузов с ака-демическими и отраслевыми научными органи-зациями. Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. Архангельск: Издательский дом имени В.Н. Булатова, 2015. С. 126–131.
7. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В., Жируев С.П. Ли-толого-стратиграфические комплексы снежного покрова // Криосфера Земли. 2018. Т. XXIV. № 1. С. 72–93.
8. Коломыц Э.Г. Структура снега и ландшафтная ин-дикация. М.: Наука, 1976. 206 с.
9. Древилло М.С. Геоэкологические исследования снежного покрова на основе его ландшафтно-ин-дикационных свойств: на примере о. Сахалин: Ав-тореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Барнаул: ИВиЭП СО РАН, 2001. 27 с.
10. Kazakov N.A., Gensirovskiy J.V., Zhiruev S.P., Dre-tillo M.S. Stratigrafic complexes of a snow cover // An-nals of Glaciology. 2012. V. 58 (61). P. 39–44.
11. Рихтер Г.Д. Использование снега в народном хо-зяйстве // Вопросы изучения снега и использо-вания его в народном хозяйстве. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 5–22.
12. Савельев Б.А. Строеение и состав природных льдов. М.: изд. МГУ, 1980. 280 с.
13. Котляков В.М. Избранные сочинения. Кн. 5. В мире снега и льда. М.: Наука, 2002. 383 с.
14. Геологический словарь. В 2-х томах. М.: Недра, 1978. 970 с.
15. Николаев В.А. Проблемы регионального ландшаф-товедения. М.: изд. МГУ, 1979. 160 с.
16. Епифанов В.П., Казаков Н.А. Пенетромтр. Патент Российской Федерации № 137923. Зарегистриро-ван в Госреестре 5 февраля 2014 г. Бюл. № 6.
1. Zyuzin J.L. Suroviy lik Hibin. These vere face of Khibin. Murmansk: Advertising polygraphy, 2006: 236 p. [In Russian].
2. Savel'ev B.A., Laptev M.N., Lapteva N.I. Structure, composition, physical and mechanical properties of snow in Khibiny and their changes in the process of metamorphism. *Sneg I laviny Hibin*. Snow and ava-lanches of Khibiny. Moscow: Moscow State Univer-sity, 1967: 201–239. [In Russian].
3. Tushinskij G.K. Laviny. Vozniknovenie I zashchita ot nih. Avalanches. Occurrence and protection from them Moscow: Geografiz, 1949: 214 p. [In Russian].
4. Tushinskij G.K. Snowpack evolution. *Voprosy Geografii*. Problems of Geography. 1950, 27: 350–355. [In Russian].
5. Kolomyts E.G. *Teoriya ehvolucii v strukturnom snegove-denii*. Evolution Theory in Structural Snow Studies. Moscow: GEOS, 2013: 435 p. [In Russian].
6. Kazakov N.A. Litho-stratigraphic complexes of snow cover: the evolution of snow cover in the Arctic and the forecast of changes in the physical and mechanical characteristics of the snow pack. *Kompleksnye nauchnye issledovaniya i sotrudnichestvo v Arktike: vzaimodejstvie vuzov s akademicheskimi i otraslevymi nauchnymi organizatsiyami*. *Materialy Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem*. Integrated research and cooperation in the Arctic: in teraction of universities with academic and industry scientific organizations. Materials of the All-Russian Conf. with intern. cooperation. Arkhangel'sk: Izdatel'skij Dom SAFU, 2015: 126–131. [In Russian].
7. Kazakov N.A., Gensirovskiy J.V., Zhiruev S.P. Litholog-ical and stratigraphic complexes of snow cover. *Krios-fera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2018, XXIV (1): 72–93. [In Russian].
8. Kolomyts E.G. *Struktura snega i landshaftnaya indikaci-ya*. Snow structure and landscape indication. Moscow: Nauka, 1976: 206 p. [In Russian].
9. Drevilo M.S. *Geoekologicheskie issledovaniya snezhno-go pokrova na osnove ego landshaftno-indikatsionnykh svoystv: na primere o. Sakhalin*. Geocological studies of snow cover on the base of its landscape-indication properties: Sakhalin Island as an example. PhD-thesis. Barnaul IViEP SO RAN, 2001: 27 p. [In Russian].
10. Kazakov N.A., Gensirovskiy J.V., Zhiruev S.P., Dre-tillo M.S. Stratigrafic complexes of a snow cover. An-nals of Glaciology. 2012, 58 (61): 39–44.
11. Rikhter G.D. The use of snow in the national economy. *Voprosy izucheniya snega i ispol'zovaniya ego v narodnom khozyajstve*. Questions of the study of snow and its use in the national economy. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1955: 5–22. [In Russian].
12. Savel'ev B.A. *Stroenie i sostav prirodnih l'dov*. Structure and composition of natural ice. Moscow: MGU, 1980: 280 p. [In Russian].
13. Kotlyakov V.M. *Izbrannye sochineniya. Kn. 5. V mire snega i l'da*. Selected essays. Book 5. In the world of snow and ice. Moscow: Nauka, 2002: 383 p. [In Russian].
14. *Geologicheskij slovar'*. Geological dictionary. In 2 vol-umes. Moscow: Nedra, 1978: 970 p. [In Russian].
15. Nikolaev V.A. *Problemy regional'nogo landshaftovedeni-ya*. Problems of regional landscape studies. Moscow: MGU, 1979: 160 p. [In Russian].

17. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова) // МГИ. 2012. Вып. 2. 80 с.
18. Sokratov S.A., Kazakov N.A. Dry-snow metamorphism expressed by crystalshape // Annals of Glaciology. 2012. V. 58 (61). P. 51–56.
19. Коломыц Э.Г. Методы кристалло-морфологического анализа структуры снега. М.: Наука, 1977. 199 с.
20. Кононов И.А. Разработка программного комплекса для автоматизации стратиграфических исследований снежной толщи в снежных шурфах // Материалы 4-й Всерос. конф. молодых учёных «Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России». Владивосток: Дальнаука, 2012. С. 264–265.
21. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 2. Мурманская область. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 316 с.
22. <https://rp5.ru>.
23. Атлас Мурманской области. М.: изд. ГУГК, 1971. 44 с.
24. Лошкарева А.Р., Королева Н.Е. Крупномасштабная карта растительности ключевого участка в лесотундре Кольского полуострова: методические особенности составления и анализ // Геоботаническое картографирование: Ежегодник. 2013. С. 112–124.
25. Черненко Т.В., Пузаченко М.Ю., Басова Е.В., Королева Н.Е. Ценотическое разнообразие и картографирование растительного покрова центральной части Мурманской области // Геоботаническое картографирование: Ежегодник. 2015. С. 78–94.
26. Казаков Н.А. Стратиграфия снежной толщи в долинах рек Кунийок, Вудьяврийок (Хибины). Тез. докл. XIV гляциол. симпозиума «Гляциология от Международного геофизического года до Международного полярного года». Иркутск: изд. Ин-та географии СО РАН, 2008. С. 45.
27. Музыченко А.А., Волков А.В., Рябчиков М.В. Погребённая в снежной толще зернистая изморозь как один из факторов формирования лавиноопасных слоев в Хибинах // Сб. трудов III Междунар. симпозиума «Физика, химия и механика снега». Ч. I. ДВГИ ДВО РАН. Южно-Сахалинск: Типография КАНО, 2017. С. 80–86.
16. Epifanov V.P., Kazakov N.A. Penetrometr. Penetrometer. Patent of the Russian Federation № 137923 Registered in the state. Register 05 February 2014, 6. [In Russian].
17. International Classification for Seasonal Snowfall (guide to the description of snow thickness and snow cover). *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2012, 2: 80 p. [In Russian].
18. Sokratov S.A., Kazakov N.A. Dry-snow metamorphism expressed by crystal shape. Annals of Glaciology. 2012, 58 (61): 51–56.
19. Kolomyts E.G. *Metody kristallo-morfologicheskogo analiza struktury snega*. Crystallomorphological methods of analysis of the snow structure. Moscow: Nauka, 1977: 199 p.
20. Kononov I.A. Development of a software package for the automation of stratigraphic studies of the snow layer in snow pits. *Materialy 4 Vseros. konf. Molodyh uchyonnyh «Sovremennye problem geologii, geohimii i geoekologii Dal'nego Vostoka Rossii»*. «Modern problems of geology, geochemistry and geocology of the Far East of Russia». Proc. of the 4th Russ. Young Scientist Conf. Vladivostok: Dal'nauka, 2012: 264–265. [In Russian].
21. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Vypusk 2. Murmanskaya oblast'.* Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Is. 2. Murmansk region. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988: 316 p. [In Russian].
22. <https://rp5.ru>.
23. *Atlas Murmanskoy oblasti.* The Murmansk Region. An Atlas. Moscow: GUGK, 1971: 44 p. [In Russian].
24. Loshkareva A.P., Koroleva N.E. Large-scale vegetation map of a key area in the forest tundra of the Kola Peninsula: methodological features of compilation and analysis. *Geobotanicheskoe kartografirovanie: Ezhegodnik*. Geobotanical mapping: Yearbook. 2013: 112–124. [In Russian].
25. Chernen'kova T.V., Puzachenko M.Yu., Basova E.V., Koroleva N.E. Coenotic diversity and mapping of vegetation cover in the central part of the Murmansk region. *Geobotanicheskoe kartografirovanie: Ezhegodnik*. Geobotanical mapping: Yearbook. 2015: 78–94. [In Russian].
26. Kazakov N.A. Stratigraphy of the snow pack in the valleys of the Kuniyok and Vudyavryok rivers (Khibiny). *Tezisy dokladov XIV Glyaciologicheskogo simpoziuma «Glyaciologiya from Mezhdunarodnogo geofizicheskogo goda do mezhdunarodnogo Polyarnogo goda»*. Thesis of the XIV Glaciological Symposium «Glaciology from the International Geophysical Year to the International Polar Year». Irkutsk: Institut geografii SO RAN, 2008: 45. [In Russian].
27. Muzychenko A.A., Volkov A.V., Ryabchikov M.V. Hard rime buried in snow as following one of the factors of avalanche formation in hibins. *Sb. tr. III Mezhdunar. simp. «Fizika, himiya i mekhanika snega»*. 3th Intern. Symposium «Physics, chemistry and mechanics of snow». Yuzhno-Sakhalinsk, 2017: 80–86. [In Russian].